

# Braided Shield를 가진 동축 케이블의 HEMP 결합 신호 해석

## Analysis of HEMP Coupling Signal for a Coaxial Cable with Braided Shields

이진호 · 조제훈\* · 김응조

Jinho Lee · Jeahoon Cho\* · Eungjo Kim

### 요약

HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse, 고 고도 전자기 펄스) 신호는 매우 큰 전계 값과 매우 빠른 상승시간 등으로 인해 그 영향 범위 안에 노출되어 있는 시스템은 심각한 손상을 입을 수도 있다. HEMP로부터 시스템을 적절하게 방호하기 위해서는 방호 설계 사양 도출 이전에 시스템의 개구면이나 케이블에 대한 전자기 결합 신호 해석이 먼저 수행되어야 한다. 본 논문에서는 RF 또는 비디오 신호 등을 전송하기 위해 사용되는 동축 케이블에 대한 HEMP 결합 신호를 해석하였고, 차폐선에 대한 HEMP 감소 효과를 확인하기 위해 단일 도선과 동축 케이블 내부 도선에 대한 결합 신호를 비교하였다. 동축 케이블은 차폐선의 외부 영역과 내부 영역으로 각각 분리되어 해석되었으며, 차폐선 표면 위의 전류 계산을 위해 동축 케이블 외부 영역에는 일반화된 산란방정식을 적용하였고, 동축 케이블 내부 영역에는 Chain Matrix 알고리즘을 적용하였다. 본 논문의 해석 결과를 검증하기 위해 기존 논문의 결과 데이터와 비교하였고, 두 결과가 비슷한 경향을 나타내었다.

### Abstract

The system which is exposed in the impact range of High-altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) may get serious damage because HEMP has a very large electric field value, a very fast rise-time, and so on. Electromagnetic analysis should be performed for signals coupled to the opening or cables of the system prior to derive the system design specifications in order to protect the system against HEMP adequately. In this paper, we analyzed the HEMP coupled signals for the coaxial cable which is generally used to transmit and receive video or RF signals and compared the coupled signal of the one wire with that of the inner conductor of a coaxial cable to confirm the decreased effect of HEMP by the shield. The coaxial cable is analyzed by the external and internal region of the shield separately. For the external region of the coaxial cable, general scattered equation was applied to calculate currents on the surface of the shield and for internal region of the coaxial cable, chain matrix algorithm is used. To verify this paper the analyzed results were compared the results of the existing paper and the two results have good agreements.

Key words : Coaxial Cable, Chain Matrix, General Scattered Equation, HEMP

### I. 서론

고고도(지표면에서 40 km 이상) 핵 폭발 시 폭풍

파, 열복사, 방사능과 함께 감마선이 방출하게 되는데 감마선은 폭풍파, 열복사, 방사능과는 달리 대기층까지 도달하여 대기층의 공기 분자와 충돌함으로

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

\*한양대학교 전자통신공학과(Dept. of Electronic & Communications Engineering, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20110608-051

· 교신저자 : 김응조(e-mail : kej6246@kornet.net)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 3일

써 콤프톤 전자를 발생시킨다<sup>[1]</sup>. HEMP(High-altitude ElectroMagnetic Pulse)는 이러한 콤프톤 전자들이 지구 지자계 방향을 따라 나선 모양으로 움직일 때 발생하는 것으로서, 단펄스, 중펄스, 장펄스가 복합된 형태의 파형을 가지고 지표면까지 전달된다<sup>[2]</sup>.

특히, HEMP의 단펄스 파형은 매우 짧은 시간동안 수십 kV/m의 최대치를 가지고 지표면으로 전달되기 때문에 그 영향 범위 안에 노출되어 있는 시스템은 일시 정지, 파괴 등 심각한 운용상의 손실을 입게 된다. HEMP로부터 시스템을 적절하게 보호하기 위해서는 첫째, HEMP 입사 환경에서의 시스템에 대한 각 구획별 방호 토폴러지를 결정하고<sup>[3]</sup> 각 지정된 구획별로 HEMP 결합 신호를 해석한다. 둘째, 그 해석된 결과를 시스템의 외부 신호 내성 특성과 비교, 분석함으로써 시스템 각 구획별로 알맞은 방호 장치를 장착하여야 한다<sup>[4]</sup>. 일반적으로 HEMP는 시스템의 개구면이나 케이블을 통하여 대상 장비에 영향을 주기 때문에 HEMP에 대한 시스템의 개구면 및 케이블 해석은 시스템의 방호 설계 도출을 위해 매우 중요한 역할을 차지한다.

본 논문에서는 시스템의 다양한 연동 케이블 중 RF 및 비디오 등의 신호를 전송하기 위해 사용되는 동축 케이블에 대한 HEMP 결합 신호를 해석하였다. 동축 케이블은 차폐선 외부 영역과 내부 영역으로 분리되어 각각 계산되었으며, 외부 결합 신호와 내부 결합 신호와의 전달 메커니즘의 구현은 전달 임피던스를 통하여 수행되었다. 차폐선 외부 영역에 대해서는 접지면과 케이블은 균일하다고 가정하여, 외부 HEMP로부터 차폐선 표면에 발생하는 전류와 차폐선과 지표면 사이의 전압 계산이 가능한 일반화된 산란 방정식을 도입하였고<sup>[5]</sup>, 차폐선 내부 영역에 대해서는 twisted cable 등과 같은 비균일 전송선 해석이 가능한 chain matrix 알고리즘을 적용하였다<sup>[6],[7]</sup>. 전달 임피던스를 얻기 위해서는 차폐선의 편조 개수, 편조 방향, 편조 선 간의 거리 등 케이블의 차폐선 사양으로부터 계산하는 방법<sup>[8]</sup>과 차폐선에 전류를 직접 인가하여 구할 수 있는 측정 방법<sup>[9]</sup>이 있다. 본 논문에서는 동축 케이블의 차폐선 사양으로부터 전달 임피던스를 유도하였고, 케이블 해석 모델로는 braided 차폐선을 가진 RG58을 선정하였다. 또한, 본 논문의 해석 결과에 대한 검증을 위해 기존 논문의

결과<sup>[10]</sup>와 비교하였고, 두 데이터들이 비슷한 경향을 나타내었다. 마지막으로 차폐선이 HEMP 결합 신호 감소에 미치는 영향성 확인을 위해 높이, 길이 등 동일한 사양을 가진 단일 도선과 동축 케이블에 결합되는 HEMP 신호를 비교하였다.

## II. 본 론

### 2-1 동축 케이블의 HEMP 결합 해석 절차

그림 1은 상호 시스템에 연결되는 동축 케이블과 시스템에 입사하는 HEMP를 보여주고 있다. 본 논문은 관심 대상인 시스템 2의 인입구 지점에 방호 장치를 장착하기 위해 시스템 2의 인입구 지점( $Z_4$ )에서의 HEMP 결합 신호를 해석하였다.

동축케이블은 x축에 나란히 위치해 있고, HEMP는 동축 케이블과  $\theta$ 의 각도로 입사하며, 시스템 1과 2는 완전 차폐 영역이라고 가정하였다. 시간 영역에서의 HEMP 파형은 식 (1)과 같고, 본 논문에서는 시간 영역의 파형을 주파수 영역으로 변화하여 동축 케이블에 대한 HEMP 결합 신호를 해석하였다.

$$E_i(t) = E_0 \times (e^{-at} - e^{-bt}) \quad [\text{V/m}] \quad (1)$$

그림 2는 동축 케이블과 같은 차폐선을 가진 케이블의 HEMP 결합 신호 해석 절차를 보여주고 있다.

### 2-2 외부 전송선 해석

동축 케이블 외부 전송선에 대한 HEMP 결합 신호 해석을 위해 접지면과 동축 케이블 차폐선에 대한 전송선 등가 모델은 그림 3과 같다.

$V_s$ 와  $I_s$ 는 HEMP 성분 중 전송선 내에서 Y방향

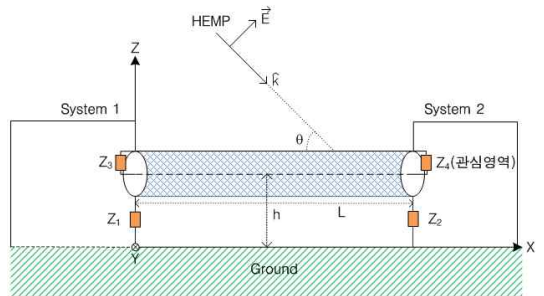


그림 1. HEMP에 노출된 동축 케이블  
Fig. 1. The coaxial cable exposed to HEMP.

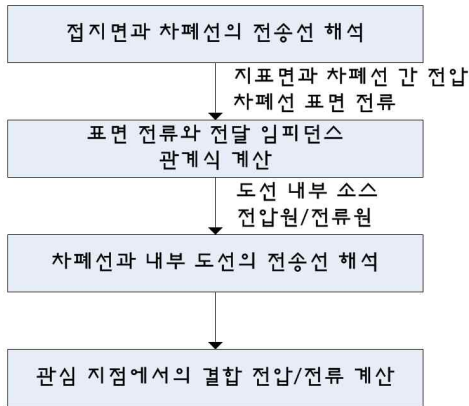


그림 2. 동축 케이블의 HEMP 해석 절차  
Fig. 2. The procedure of analysis of HEMP coupling to a coaxial cable.

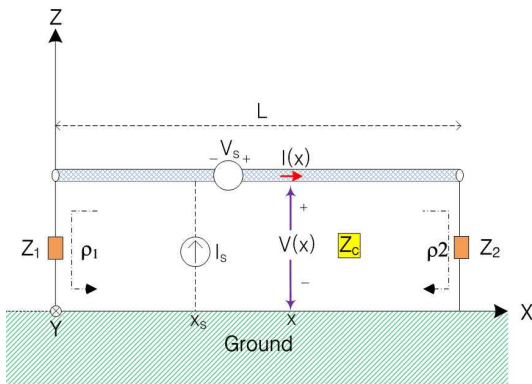


그림 3. 외부 전송선에 대한 등가 모델  
Fig. 3. The equivalent model for the external transmission line.

으로의 자계와 Z 방향으로의 전계에 의해 발생하는 분산된 전압, 전류원이고, 그 위치는  $x_s$ 이다<sup>[5]</sup>.

$V(x)$ 는 차폐선과 접지면 사이의 전위차이고,  $I(x)$ 는 차폐선 표면에 흐르는 전류로서,  $x$ 에 위치한다.  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 는 차폐선 양 종단에 대한 반사계수이고, 차폐선과 접지면 사이 전송선에 대한 특성 임피던스는  $Z_c$ 로 표현된다. 차폐선과 접지면에 사이에 발생하는  $V(x)$ ,  $I(x)$ 에 대한 계산식은 일반화된 산란 방정식인 식 (2)~(5)로 표현할 수 있다<sup>[5]</sup>.

$$x > x_s$$

$$V(x) = \frac{e^{-\gamma x} + \rho_2 e^{\gamma(x-2L)}}{2(1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2\gamma L})} [(e^{\gamma x_s} - \rho_1 e^{-\gamma x_s}) V_s + (e^{\gamma x_s} + \rho_1 e^{-\gamma x_s}) Z_c I_s] \quad (2)$$

$$I(x) = \frac{e^{-\gamma x} - \rho_2 e^{\gamma(x-2L)}}{2Z_c(1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2\gamma L})} [(e^{\gamma x_s} - \rho_1 e^{-\gamma x_s}) V_s + (e^{\gamma x_s} + \rho_1 e^{-\gamma x_s}) Z_c I_s] \quad (3)$$

$$x < x_s$$

$$V(x) = \frac{e^{\gamma(x-L)} + \rho_1 e^{-\gamma(x+L)}}{2(1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2\gamma L})} [-(e^{\gamma(L-x_s)} - \rho_2 e^{-\gamma(L-x_s)}) V_s + (e^{\gamma(L-x_s)} + \rho_2 e^{-\gamma(L-x_s)}) Z_c I_s] \quad (4)$$

$$I(x) = \frac{e^{\gamma(L-x)} - \rho_2 e^{-\gamma(x+L)}}{2Z_c(1 - \rho_1 \rho_2 e^{-2\gamma L})} [-(e^{\gamma(L-x_s)} - \rho_2 e^{-\gamma(L-x_s)}) V_s + (e^{\gamma(L-x_s)} + \rho_2 e^{-\gamma(L-x_s)}) Z_c I_s] \quad (5)$$

### 2-3 전달 임피던스 해석

외부 차폐선에서 내부 도선으로 전달되는 전압/전류원에 대한 결합 메커니즘은 전달 임피던스와 전달 어드미턴스로 표현된다. 그림 4는 동축 케이블의 단면적을 보여주고 있으며, Braided 차폐선의 구조는 그림 5와 같다.

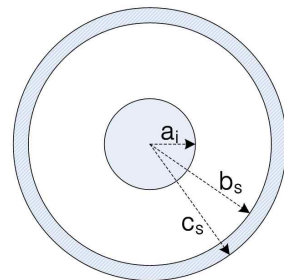


그림 4. 동축 케이블의 단면  
Fig. 4. The cross-section of the coaxial cable.

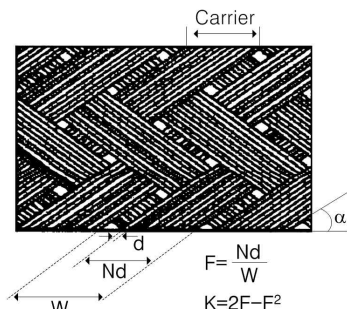


그림 5. Braided shield의 구조  
Fig. 5. Geometry of a braided shield.

식 (6)은 전달 임피던스를 나타내며, 상세 파라미터는 식 (7)~(10)과 같다<sup>[8]</sup>.

$$Z_T = Z_d + j\omega M_{12} \text{ [}\Omega/\text{m]} \quad (6)$$

$$Z_d = R_0 \frac{(1+j)\Delta/\delta}{\sinh[(1+j)\Delta/\delta]} \quad (7)$$

$$R_0 = \frac{1}{2\pi\sigma b_s \Delta} \quad (8)$$

$$M_{12} = \frac{\pi\mu}{6\zeta} (1-K)^{3/2} \frac{e^2}{E(e) - (1-e^2)K(e)}, \quad (\alpha < 45^\circ)$$

$$= \frac{\pi\mu}{6\zeta} (1-K)^{3/2} \frac{e^2/\sqrt{1-e^2}}{E(e) - (1-e^2)K(e)}, \quad (\alpha > 45^\circ) \quad (9)$$

$$e = \sqrt{1 - \tan^2 \alpha}, \quad (\alpha < 45^\circ)$$

$$= \sqrt{1 - \cot^2 \alpha}, \quad (\alpha > 45^\circ) \quad (10)$$

여기서,  $\zeta$ 는 차폐선 carrier의 개수,  $\Delta$ 는 차폐선의 두께,  $F$ 는 fill,  $K$ 는 optical coverage,  $E(e)$ 와  $K(e)$ 는 complete elliptic integral 함수이다. 식 (6)~(10)에서 볼 때 전달 임피던스는 편조 개수, 각도 등과 같은 차폐선의 고유 사양에 따라 정해지는 값임을 알 수 있다.

식 (11)은 전달 어드미턴스를 나타내며, 그에 대한 상세 파라미터는 식 (12)와 같다<sup>[8]</sup>.

$$Y_T = j\omega C_{12} \text{ [S/m]} \quad (11)$$

$$C_{12} = \frac{\pi C_1 C_2}{6\epsilon\zeta} (1-K)^{3/2} \frac{1}{E(e)}, \quad (\alpha < 45^\circ)$$

$$= \frac{\pi C_1 C_2}{6\epsilon\zeta} (1-K)^{3/2} \frac{\sqrt{1-e^2}}{E(e)}, \quad (\alpha > 45^\circ) \quad (12)$$

여기서,  $C_1$ 은 단위 길이당 접지면과 차폐선 사이의 커패시턴스이고,  $C_2$ 는 단위 길이당 차폐선과 내부 도선사이의 커패시턴스이다. 보통  $C_1$ 과  $C_2$ 는 매우 작으므로 전달 어드미턴스에 의한 케이블 결합 신호는 거의 발생하지 않는다. 또한, 전달 임피던스는 차폐선의 고유 특성만을 보장하는 값이 아니라 케이블 설치 환경에 따라 변하는 값이므로 케이블 제작사에서는 케이블 data sheet로 전달 임피던스만을 제공한다. 본 논문에서는 전달 임피던스에 의한 차폐선 내부의 결합 현상만을 고려하였고, 전달 어드미턴스 파라미터에 대한 결합 현상은 전달 어드미턴스로 두어 해석 시에는 고려하지 않았다.

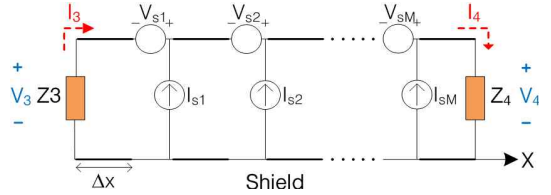


그림 6. 내부 전송선의 등가모델

Fig. 6. The equivalent model for the internal transmission line.

#### 2-4 내부 전송선 해석

식 (13), 식 (14)는 차폐선과 접지면 사이의 표면 전류  $I(x)$ 와 전압  $V(x)$ 에 의해 만들어지는 동축 케이블 내부 전송선의 분산된 전압 및 전류원에 대한 계산식이다.

$$V_{si}(x) = Z_T I(x) \quad (13)$$

$$I_{si}(x) = Y_T V(x) \quad (14)$$

그림 6은 동축 케이블 내부 전송선에 대해 단위 길이 당 분산된 전압원, 전류원을 다중으로 연결하여 표현한 등가 모델이다.

그림 6에서 단위 길이의 전송선을 chain matrix 알고리즘으로 변환하면 그림 7과 같이 다중의 chain matrix C가 반복되는 형태로 나타난다. 분산된 전압원, 전류원이  $M$ 개이고, 단위 도선의 길이는  $M+1$ 개이므로 chain matrix C는  $M+1$ 개로 구성된다. 단위 길이  $\Delta x$ 는  $\lambda/20$ 을 설정하였고, 전달 어드미턴스는 0으로 계산하였으므로 그림 7에서 분산된 전류원  $I_{si}(x)$ 에 대한 값은 0이다.

단일 길이( $\Delta x$ )에 대한 chain matrix C의 내부 파라미터는 식 (15)와 같다.

$$C = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\Delta x) & j\omega\Delta x \left\{ \frac{\sinh(\gamma\Delta x)}{\gamma\Delta x} \right\} \tilde{L} \\ j\omega\Delta x \left\{ \frac{\sinh(\gamma\Delta x)}{\gamma\Delta x} \right\} \tilde{C} & \cosh(\gamma\Delta x) \end{bmatrix} \quad (15)$$

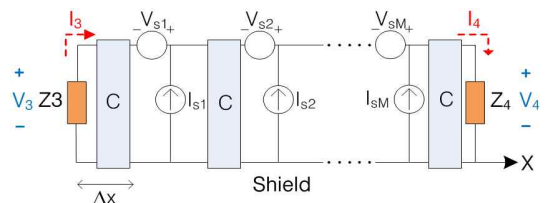


그림 7. 내부 도선의 chain matrix 모델

Fig. 7. Chain matrix model of the inner conductor.

$\tilde{L}$ 과  $\tilde{C}$ 는 동축 케이블 내부의 인덕턴스와 커패시턴스이며, 식 (16)과 식 (17)로 정의된다.

$$\tilde{L} = \mu_i \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{b_s}{a_i}\right) \tag{16}$$

$$\tilde{C} = \left( \frac{2\pi\epsilon_i}{\ln\left(\frac{b_s}{a_i}\right)} \right) \tag{17}$$

여기서,  $\mu_i$ ,  $\epsilon_i$ 는 동축 케이블 내부의 투자율과 유전율을 의미한다.

다중으로 연결된 chain matrix에 대해 동축 케이블 내부 부하인  $Z_3$ ,  $Z_4$ 에서 결합되는 전압, 전류에 대한 표현식은 식 (18)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_3 \\ I_3 \end{bmatrix} &= \overbrace{C \cdot C \cdot C \dots C}^{M+1} \begin{bmatrix} V_4 \\ I_4 \end{bmatrix} + \overbrace{C \cdot C \dots C}^M \begin{bmatrix} -V_{sM} \\ -I_{sM} \end{bmatrix} \\ &+ \dots + C \begin{bmatrix} -V_{s1} \\ -I_{s1} \end{bmatrix} \\ &= C^{M+1} \begin{bmatrix} V_4 \\ I_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s^T \\ I_s^T \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A^T & B^T \\ C^T & D^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_4 \\ I_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s^T \\ I_s^T \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{18}$$

식 (18)과 최종 단에서의 경계 조건인 식 (19)를 적용하면, 관심 영역인  $Z_4$ 에서 결합되는 최종 전류는 식 (20)과 같다.

$$V_4 = I_4 Z_4 \tag{19}$$

$$I_4 = \frac{(-V_s^T) + Z_3(-I_s^T)}{A^T Z_4 + B^T + C^T Z_3 Z_4} \tag{20}$$

### III. 해석 결과

그림 8은 동축 케이블 차폐선의 표면 전류에 대해 해석 결과와 기존 논문<sup>[10]</sup>의 결과를 주파수 영역에서 비교한 그래프이고, 차폐선 최종단인  $Z_2$ 에서의 결합 전류이다. 입사하는 HEMP의 파라미터는  $E_0 = -67,000$  V/m,  $a = 3.7 \times 10^6$  s<sup>-1</sup>,  $b = 2.0 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>이고, 차폐선은  $b_s = 1.397$  mm,  $c_s = 1.524$  mm,  $h = 0.735$  m,  $L = 6$  m,  $Z_1 = 10$  MΩ,  $Z_2 = 2$  Ω이며, 지표면은 PEC로 설정하였다. 일반적으로 개방(open) 회로는 수십 MΩ, 단락 회로는 2 Ω 이하로 표현하므로 본

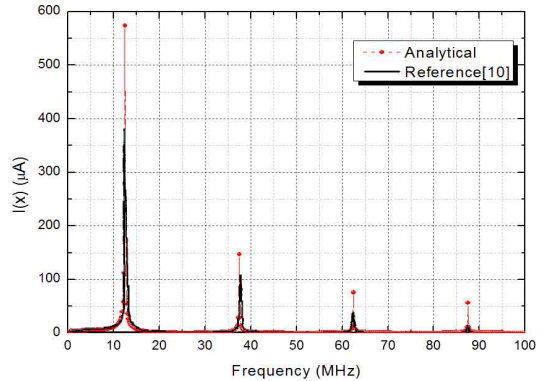


그림 8. 주파수 영역에서의 차폐선 표면 전류  
Fig. 8. The shield currents in the frequency domain.

논문의 케이블 차폐선은  $Z_1$ 은 개방,  $Z_2$ 는 단락된 형상이다.

그림 8에서부터 동축 케이블 차폐선의 표면 전류  $I(x)$ 는 약 13 MHz 가장 큰 HEMP 결합 현상이 발생하였고, 주파수가 증가할수록 크기가 점점 작아짐을 확인할 수 있었다. 일부 특정 주파수에서 reference와의 차이는 최대 주파수, 주파수 샘플링 등 일부 해석 파라미터 차이에 의한 것이다.

그림 9는 RG58에 대한 전달 임피던스 비교 그래프이다. 여기서,  $\zeta = 12$ ,  $\alpha = 27.7^\circ$ 이다.

전달 임피던스가 100 MHz 이하에서 1 Ω/m 미만으로 나타나므로, 단위 길이 당 계산되는 차폐선 표면 전류는 감소된 동축 케이블 내부의 전압원을 발생시킴을 알 수 있다.

그림 10, 그림 11은 외부 HEMP 신호가  $Z_4$ 에서 결합되어 나타나는 전압에 대하여 주파수와 시간 영역

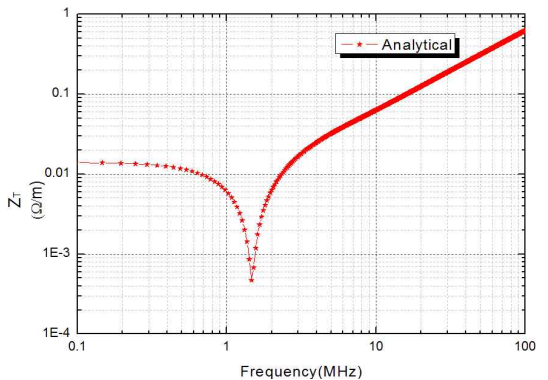


그림 9. RG58 동축 케이블의 전달 임피던스  
Fig. 9. The transfer impedance of RG58 coaxial cable.

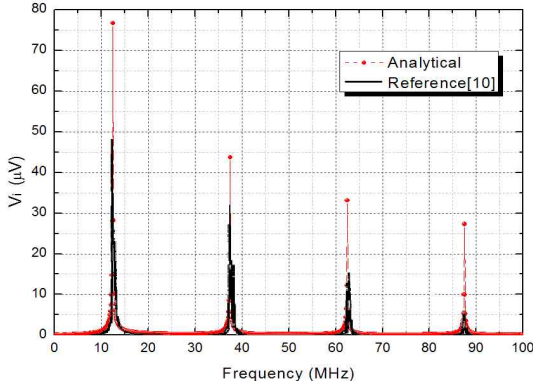


그림 10.  $Z_4$ 에 대한 주파수 영역에서의 결합 전압  
Fig. 10. The coupled voltage at  $Z_4$  in frequency domain.

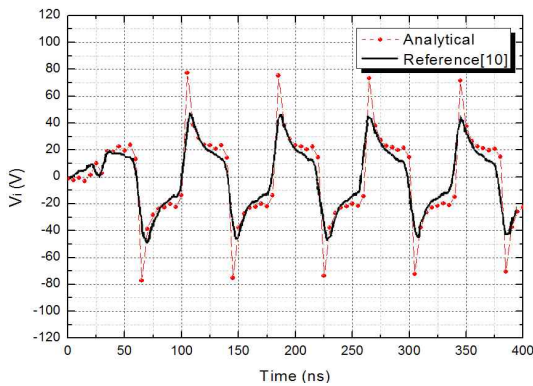


그림 11.  $Z_4$ 에 대한 시간 영역에서의 결합 전압  
Fig. 11. The coupled voltage at  $Z_4$  in time domain.

으로 표현하였다. 케이블 내부는  $a_i = 0.451$  mm,  $\epsilon_{ir} = 1.85$ ,  $\mu_{ir} = 1$ ,  $Z_3 = Z_4 = 50$   $\Omega$ 이고, 차폐선의 재질은 알루미늄이다. 그림 8 처럼 약 13 MHz에서 가장 큰 값을 보여주었고, 결합된 신호가 반복되면서 매우 조금씩 감소하는 것으로 해석되었다. 시간 영역에서 해석 결과는 reference와 약 30 V의 오차 크기와 더 날카로운 파형을 나타내었다. 그 이유는 reference의 경우 차폐선 및 케이블 내부 도선에 대해 직접적으로 HEMP의 결합 현상 해석하는 multi-conductor 해석 방법을 적용하였기 때문이다.

그림 12는 동일한 높이와 길이를 가진 동축 케이블 및 단일 도선에 대하여  $Z_4$ 에서 결합되는 전압을 비교하였다. 그림 9의 전달 임피던스를 가진 차폐선이 있을 때와 없을 때에 대해 전압차는 약 7,000 V 정도 발생하는 것으로 분석되었다. 이것은 차폐선

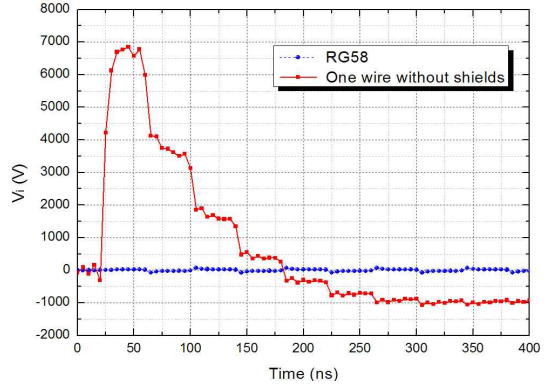


그림 12.  $Z_4$ 에서의 결합 전압 비교  
Fig. 12. Comparison of the coupled voltage at  $Z_4$ .

양 단에 걸리는 부하가 얼마인가에 따라 달라지겠지만 한 쪽 차폐선의 접지가 개방되었다고 하더라도 차폐선이 있을 때가 없을 때보다 훨씬 큰 HEMP 신호를 감소시킴을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

Braided shield를 가진 동축 케이블에 대한 전자기 결합 현상 해석은 braid 구조의 특성상 수치해석 방법을 이용하기 보다는 전송선 이론을 적용해야 한다. 본 논문에서는 RG58 동축 케이블에 대해 차폐선을 기준으로 외부와 내부 영역으로 구분하여 방호하고자하는 지점에서의 HEMP 결합 신호를 해석하였다. 또한, 해석 결과의 검증은 위해 기존 논문의 해석 결과와 비교하였고, 주파수 및 시간영역 모두에서 두 해석 결과가 비슷한 경향을 보였다. 검증된 해석 방법을 활용하여 동일한 높이와 길이를 가진 동축 케이블과 단일 도선에 대한 HEMP 결합 신호의 차이를 분석함으로써 차폐선의 HEMP 신호 감소 효과를 확인할 수 있었다. 본 논문의 해석 알고리즘은 군 시스템의 케이블 전자기 해석을 위해 적용할 예정이며, 임의의 비균일한 차폐선 케이블에 대한 HEMP 결합 신호 해석방법을 개발해 나갈 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] IEC-61000-2-9, *Discription of HEMP Environment - Radiated Disturbance*, 1996.
- [2] MIL-STD-464A, *Electromagnetic Environmental Eff-*

- ects, *Requirements for System*, Department of Defense, 2002.
- [3] F. M. Tesche, "Topology concepts for internal EMP interaction", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-26, no. 1, Jan. 1978.
- [4] MIL-STD-188-125-2, *High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time-Urgent Missions, Part 2 Transportable Systems*, 1999.
- [5] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, John Wiley and Sons, 1997.
- [6] C. R. Paul, "Solution of the transmission-line equations for three conductor lines in homogeneous media", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-20, no. 1, Feb. 1988.
- [7] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley and Sons, 2006.
- [8] D. F. Higgins, "Time-domain calculation of the leakage of SGEMP transients through braided cable shields", *IEEE Trans. Nuclear Science*, vol. 36, no. 6, Dec. 1989.
- [9] S. Sali, "Cable shielding measurements at microwave frequencies", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 46, no. 2, May 2004.
- [10] M. D'Amore, M. Feliziani, "EMP coupling to coaxial shielded cables", *IEEE International Symposium on EMC. Seattle, WA*, Aug. 1988.

### 이진호



2002년 2월: 한양대학교 전기전자공학과 (공학사)  
 2004년 2월: POSTECH 전기전자공학과 (공학석사)  
 2004년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원  
 [주 관심분야] EMI/EMC/EMP 분석 및 대책

및 대책

### 김응조



1984년 2월: 한양대학교 전기공학과 (공학사)  
 1986년 8월: 한양대학교 전기공학과 (공학석사)  
 2000년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1989년 9월~현재: 국방과학연구소 책임연구원/그룹장

[주 관심분야] EMI/EMC 설계 및 EMP 방호 대책

### 조제훈



2004년 2월: 대전대학교 통신공학과 (공학사)  
 2006년 2월: 한양대학교 전자통신 컴퓨터공학과 (공학석사)  
 2006년 3월~현재: 한양대학교 전자통신공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 전자장 수치 해석, EMI/EMC

EMI/EMC